



Desarrollo de un relevador de sobrecorriente con capacidades dinámicas de ajuste

ARTURO CONDE ENRÍQUEZ*



La aplicación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso en redes eléctricas presenta serias limitaciones de sensibilidad y tiempos elevados de operación para corrientes mínimas de fallas. El incremento desproporcionado de la densidad de carga y la escasa construcción de líneas de subtransmisión y distribución provocan que los sistemas eléctricos sean sometidos a condiciones más severas de cargabilidad. El ajuste de un relevador de sobrecorriente es mayormente comprometido, debido a que los valores mínimos de corriente de falla y ajuste del relevador son comparables, dificultando la correcta detección de la falla. Una falla en condiciones de mínima demanda representa una aportación menor de corriente; precisamente en esta condición se requiere mayor sensibilidad en la protección. Sin embargo, el ajuste de la corriente de arranque del relevador se efectúa usando los valores máximos de corriente de carga (pocos minutos por día) y en las configuraciones críticas de la red donde el relevador pueda dis-

parar por carga, como en operaciones de transferencia de potencia (esquemas de emergencia). Entonces, el ajuste de la corriente de arranque se establece durante escenarios poco frecuentes o de corta duración, teniendo como resultado una insensibilización mayor de la protección.

Otra limitación de la protección de sobrecorriente son los elevados tiempos de respaldo para fallas no máximas. El criterio de coordinación se determina para los valores máximos de corriente de falla (3-5% del total de fallas) y durante condiciones máximas de demanda (sólo unos cuantos minutos al día), debido a la convergencia de las curvas de tiempo para valores mayores de corriente. Para las fallas restantes, que son las más frecuentes, el tiempo de operación del relevador es mayor. Este comportamiento es propio de los relevadores de sobrecorriente y se ha comprobado que es adecuado para la protección de sistemas eléctricos donde es frecuente y temporal su operación sobre los valores nominales. Esta situación no es tan conveniente cuando se presenta en la protección de respaldo; por la naturaleza misma del relevador de sobrecorriente resultan elevados los tiempos de operación, sometiendo al sistema a tolerar corrientes que provocan esfuerzos térmicos y mecánicos que pudieran evitarse. La limitación de tiempo se acen-

□ El presente artículo está basado en la investigación "Desarrollo de un relevador de sobrecorriente con capacidades dinámicas de ajuste", galardonada con el Premio de Investigación UANL 2007 en la categoría de Ingeniería Tecnología, otorgado en sesión solemne del Consejo Universitario de la UANL, en septiembre de 2007.

* FIME-UANL, A.P. 36-F, CU, CP 66450, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México (con_de@yahoo.com).

túa cuando el dispositivo primario tiene una curva de tiempo con diferente grado de inversión que la del relevador de respaldo.

Se han propuesto diferentes métodos de coordinación.¹³ Todos los métodos son dependientes de canales de comunicación para actualizar los ajustes, es necesario considerar los factores económicos involucrados. En redes aisladas (rurales) o en redes altamente interconectadas, donde no es viable implementar una estrategia mediante canales de comunicación, es posible realizar el ajuste automático del relevador, utilizando la corriente local e información fuera de línea del dispositivo de protección primario. El relevador propuesto no requiere de algún medio físico de comunicación. El proceso de coordinación es automático e independiente de futuros cambios en el sistema (tales como cambios topológicos, de generación y carga).

En este trabajo se propone un relevador adaptativo de sobrecorriente de tiempo inverso. Este criterio de protección de fase puede aplicarse tanto en sistemas de potencia como en sistemas industriales. Los objetivos principales del relevador adaptativo son: incrementar la sensibilidad del relevador para corrientes mínimas de falla durante condiciones de baja demanda. Segundo, determinar una función de tiempo que asegure la operación de respaldo con un retardo constante de tiempo relativa al dispositivo primario para cualquier valor de corriente de falla.

Los beneficios del relevador propuesto son: la corriente de arranque depende de la magnitud de la corriente de carga, resultando en mayor sensibilidad de la protección cuando más lo requiere; el tiempo de respaldo es independiente de la magnitud de la corriente de falla, resultando en menor tiempo de respaldo que en relevadores convencionales.

Limitaciones del relevador de sobrecorriente

La protección de sobrecorriente emplea la corriente como único indicador de la ubicación de la falla. Sin embargo, la corriente de falla depende del voltaje de prefalla y la impedancia de Thevenin en el punto de falla. Esto provoca que el relevador de sobrecorriente tenga un alcance dinámico, dependiente de la magnitud de la corriente de falla, pre-

sentando menor sensibilidad durante mínima demanda y en fallas bifásicas. Por otra parte, la corriente máxima de carga puede ser similar en magnitud a la corriente mínima de falla; esto dificulta la correcta discriminación entre el estado normal de operación y la condición de falla.

Otro problema en la protección de sobrecorriente son los elevados tiempos de respaldo para corrientes mínimas de falla; esta limitación es originada por la corriente de carga (altos valores de arranque) y la divergencia natural de las características de operación de los relevadores. Asimismo, cuando las protecciones primaria y de respaldo tienen tipos de curvas diferentes, es difícil conseguir una coordinación adecuada.

Una solución a las limitaciones de relevadores de sobrecorriente es aplicar criterios adaptativos. En este artículo se propone una estructura de un relevador adaptativo de sobrecorriente, éste se compone de dos elementos: corriente adaptativa de arranque y tiempo adaptativo de operación.

Corriente adaptativa de arranque

Se propone un ajuste dinámico de la corriente de arranque en función de la demanda de corriente:

$$I_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_k)_j + \Delta I \quad (1)$$

donde I_k es la corriente del sistema eléctrico, ΔI representa un margen de seguridad, con un valor propuesto de 15% del valor máximo de la corriente de carga, y N debe ser seleccionado de tal manera que el intervalo $N \times \Delta t$ (periodo de muestreo) tenga una duración de entre uno y varios minutos, similar a los integradores de demanda usados en medidores eléctricos.

La ecuación (1) asegura que el relevador tenga en todo momento la corriente de arranque mínima necesaria para evitar una operación incorrecta, debido al efecto de la carga. Esto provee mayor sensibilidad, porque el valor de I_a es también pequeño durante condiciones mínimas de carga.

La lógica de control de la corriente de arranque tiene la tarea de mantener constante I_a durante una falla. Si la línea es desenergizada, la lógica de con-

trol asigna un valor máximo I_a^{\max} , el cual puede ser similar al ajuste de un relevador convencional en la misma ubicación del adaptativo. Durante un intervalo completo de demanda, el valor I_a se da en el relevador al final del intervalo previo de demanda. La acción de filtrado pasa-bajos inherente en el concepto de demanda simplifica la lógica del relevador adaptativo.

Durante incrementos súbitos de la corriente de carga (transferencia de potencia o conexión de carga), el relevador tiene una lógica de detección de falla en orden de supervisar I_a . Esta lógica incluye una verificación de la corriente de secuencia negativa y secuencia positiva, ambos combinados en una lógica OR. El detector de secuencia negativa es propuesto para detectar fallas bifásicas.⁴ En redes de bajo voltaje, la corriente de secuencia negativa originada por fallas bifásicas es mayor que la corriente de secuencia negativa originada por desbalances, permitiendo un buen ajuste. El detector de secuencia positiva se propone para detectar fallas trifásicas, éste tiene el mismo ajuste que un relevador convencional de fase. Por tanto, esta lógica discrimina entre incrementos súbitos de carga y fallas (simétricas o asimétricas).

El desempeño de la lógica de detección de falla se analiza en la red eléctrica de la figura 1a. La secuencia de operación simulada consiste en tres escenarios: desbalance en estado estable, corto circuito bifásico en la línea adyacente al *Rele A* y disparo de la línea fallada (transferencia de potencia). Se analiza el desempeño del *Rele A*; este relevador debe tolerar la condición de desbalance, respaldar la falla en la línea adyacente, y no dispara para transferencia de potencia. Durante el desbalance severo en estado estable (25%),⁵ el algoritmo no emite salida, tolerando esta condición; para esta simulación se ajustó el detector a 80 A.⁴ Durante la falla, se tiene un valor apreciable de corriente de secuencia negativa I_2 vista por el *Rele A*, permitiendo una detección y respaldo efectivo. En la última secuencia, el disparo de la línea 1 provocará una transferencia de potencia I_1 en el *Rele A*. Esta condición debe ser tolerada por el relevador, permitiendo la alimentación a la carga. El ajuste del detector de fallas simétricas fue similar al de un relevador de sobrecorriente convencional.⁵ Durante esta condición, la salida del detec-

tor de falla propuesto no está presente, tendiendo un desempeño satisfactorio.

Con el incremento de sensibilidad (reducción de la corriente de arranque), el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente se reduce. El efecto se ilustra en la figura 2. Este comportamiento es benéfico, especialmente en el tiempo de operación de la protección de respaldo, pero existe un riesgo de pérdida de coordinación. Una solución es la adaptación del tiempo de operación.

Tiempo adaptativo de operación

La función básica de la adaptación de tiempo es satisfacer, para cualquier valor de corriente de falla:

$$T_R = T_P(I^P) + CTI \quad (2)$$

donde T_R es el tiempo de operación de la protección de respaldo, T_P es el tiempo de operación de la protección primaria, en función de la corriente de operación I^P , y CTI es el intervalo de coordinación.

El propósito del proceso de adaptación es determinar una función de tiempo adaptativa, la cual defina el tiempo de operación del relevador de respaldo con un retardo de tiempo constante, relativo a la protección primaria, para cualquier valor de corriente de falla.

Debido a la corriente de carga, el tiempo de respaldo se incrementa para valores mínimos de corriente de falla, aunque ambos relevadores tengan la misma curva. Si la función de tiempo T_R se determina con base en la expresión analítica de la curva de tiempo de la protección primaria evaluada con la corriente de arranque de la misma protección más el intervalo de coordinación (ver figura 3), se tiene el cumplimiento de (2) para valores de falla constante y variable.

La expresión adaptativa del relevador se obtiene de (2). La corriente de operación (I^P) se determina con la corriente de arranque de la protección primaria ($I^P = I_k / I_a$). La función de tiempo adaptativa es:

$$\frac{1}{T_p(I^P) + CTI} \quad (3)$$

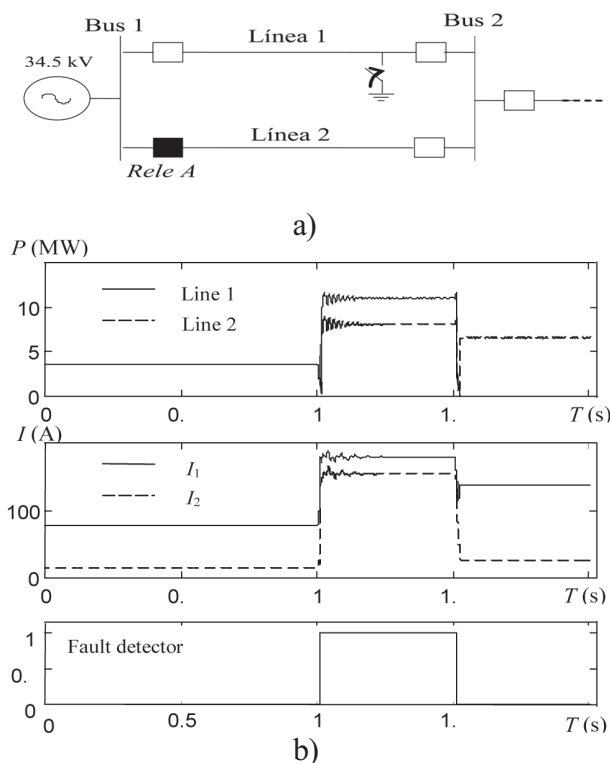


Fig. 1. Evaluación de la lógica de detección de falla propuesta.

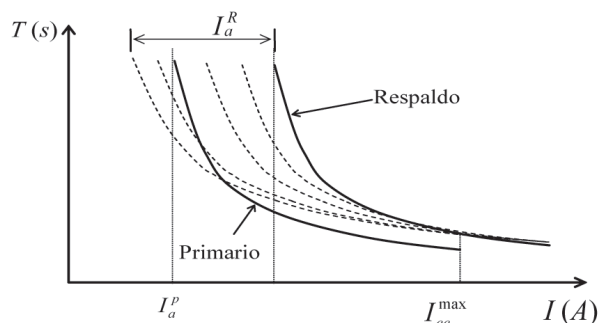


Fig. 2. Efecto de la corriente adaptativa de arranque en el tiempo de operación.

Cuando la característica de la protección primaria se conoce, $T_p(I^P)$ puede sustituirse directamente en (3). Cuando la ecuación de tiempo se desconoce, pero la gráfica está disponible, es posible obtener pares de valores (I , T) y usar un programa de ajuste de curvas fuera de línea para obtener $T_p(I^P)$.⁶⁻⁸ Si la protección primaria es un fusible, únicamente se necesita la curva de tiempo máximo de liberación; si la protección primaria es un restaurador, es necesaria la curva de tiempo y el ajuste de arranque.

La expresión analítica del relevador propuesto se obtiene de la sustitución de (3) en (2). La representación del estado dinámico del relevador de sobrecorriente, si se utiliza la función adaptativa de tiempo, es:

$$\Delta t \sum_{k=1} H(I^P) = 1 \quad \text{donde:} \quad (4)$$

$$H(I^P) = \frac{1}{T_p(I^P) + CTI}$$

Para condiciones de protección de líneas multiterminales (Relé A en la figura 1a), la característica de operación del relevador es definida por la protección primaria más lenta.

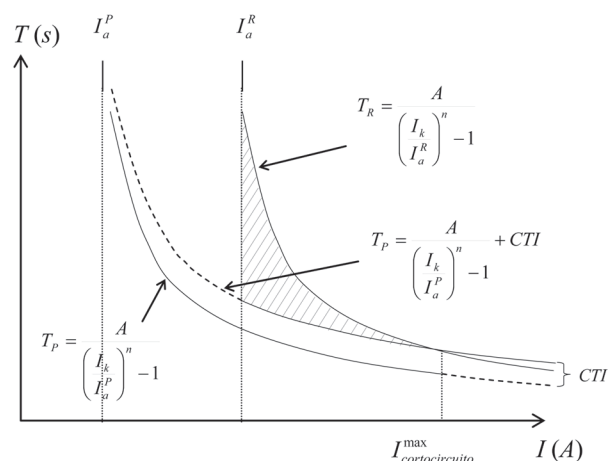


Fig. 3. Curva de tiempo propuesta.

Estructura funcional

El diagrama funcional del relevador adaptativo de sobrecorriente propuesto se muestra en la figura 4. El relevador adaptativo se compone, básicamente, de dos elementos adaptativos: corriente adaptativa de arranque, para incrementar la sensibilidad del relevador; y tiempo adaptativo de operación, para garantizar un retardo constante en la operación del relevador, independientemente de la magnitud de corriente de falla. La función principal del bloque de corriente adaptativa de arranque es detectar la falla. La corriente de arranque se determina de (1) y restringida por el ajuste de un relevador convencional I_a^{\max} . La señal (T/F) es formada en la salida; si la falla ha sido detectada ($I_k > I_a$) se emite la señal T y la condición de arranque es declarada; se inicia entonces

ces el proceso de integración en el elemento de tiempo (4). La señal F es una condición de bloqueo para la operación del relevador.

El bloque de tiempo adaptativo de operación calcula el valor de la función $H(I^p)$ presentada en (4). La integración de T_p emula la dinámica de operación de la protección primaria. El intervalo de tiempo de coordinación CTI (0.3 s) se adiciona para asegurar la coordinación entre el relevador adaptativo y el dispositivo primario. Si el elemento de corriente emite la señal permisiva T ; la señal de salida del bloque de tiempo adaptativo es integrada por el elemento de tiempo. Este proceso de integración establece la dinámica de operación del relevador en presencia de corrientes de falla variables. Finalmente, en el elemento de salida, la condición de disparo se verifica y la señal de salida se envía al circuito de disparo del interruptor.

El tiempo de operación del relevador adaptativo debe establecerse como una función de la curva de tiempo del dispositivo primario. Existe, entonces, una independencia entre el tiempo de operación del relevador adaptativo (dependiente del tiempo de operación de la protección primaria), y la corriente de arranque (determinada según (1) y actuando únicamente como detector de falla). La corriente de arranque depende de la condición de carga, permitiendo un incremento en la sensibilidad. Mediante el proceso de adaptación del tiempo de operación se obtiene una coordinación automática del relevador adaptativo con el dispositivo de protección primario. No es necesario realizar ningún procedimiento para su coordinación, aun cuando se presenten cambios en las condiciones de operación del sistema eléctrico, tales como: cambios topológicos, de generación y carga; que modifiquen la magnitud de la corriente de cortocircuito. Esto se observa en la figura 3, donde al incrementarse el valor de corriente de cortocircuito el intervalo de coordinación, según el criterio propuesto (4), se mantiene.

Durante una falla (trifásica o bifásica), la corriente de arranque del relevador adaptativo vigente se determina en el periodo anterior del cálculo de demanda, por tanto, la condición de falla es declarada y la función de tiempo es activada (figura 4).

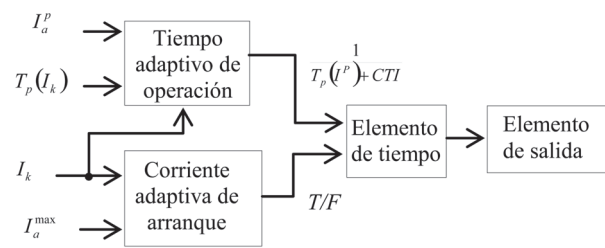


Fig. 4. Diagrama funcional del relevador adaptativo de tiempo inverso.

Se presentan dos alternativas de operación en dependencia, si la corriente de arranque del relevador adaptativo es menor a la corriente de arranque del relevador primario. En la primera alternativa, la corriente de arranque del relevador adaptativo tendrá un límite mínimo, la corriente de arranque del dispositivo primario; entonces, aun cuando el relevador adaptativo detecte la falla, el múltiplo de la corriente de arranque será menor que 1.0 y la operación no se efectuará. En la segunda alternativa, la corriente de arranque del relevador adaptativo no tendrá límite inferior, por tanto, será factible la operación del relevador adaptativo en condiciones donde el dispositivo primario no tenga sensibilidad, esta condición no representa una pérdida de coordinación; la falla entonces sería liberada por el relevador adaptativo.

Para efectuar el proceso de coordinación es necesario obtener la expresión analítica de la curva de tiempo de la protección primaria, ya sea fusible, relevador electromecánico o restaurador, incluyéndola en la expresión dinámica del relevador adaptativo. No es necesario remover los dispositivos de protección existentes. La presencia del relevador adaptativo propuesto ofrece mayores posibilidades de solucionar problemas de sensibilidad y coordinación entre dispositivos de protección.

Conde *et al.*⁹ presentan la coordinación entre una serie de relevadores de sobrecorriente (relevador adaptativo entre relevadores convencionales). La coordinación entre una serie de relevadores adaptativos se efectúa respetando el principio descrito, cada relevador tendrá la expresión analítica del relevador primario más CTI. Este proceso no implica tiempos elevados de operación para la serie de relevadores, porque el efecto de la corriente de

carga es minimizado. La I_a^{\max} para cada relevador es determinada en forma similar que en relevadores convencionales.

Comparación entre relevadores de sobrecorriente

En esta sección se presenta un estudio comparativo de sensibilidad y tiempo de operación en tres tipos de relevadores de sobrecorriente: convencional, secuencia negativa y adaptativo.

A. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó en el sistema radial mostrado en la figura 5a. La corriente de falla mínima es simulada en el Bus 4. La variación de las impedancias Z_3 y Z_4 simulan una configuración multiterminal y una variación de la corriente de carga, respectivamente. Para este análisis, los relevadores de sobrecorriente de fase se ubicaron en el Bus 2 (*Rele B*). La sensibilidad se pondera de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{I_{cc \min}}{I_a} \quad (5)$$

Los métodos para determinar los valores de sensibilidad para el relevador convencional y el de secuencia negativa se describen en Elneweih *et al.*⁴ y ANSI/IEEE Std,⁵ respectivamente. Para el relevador adaptativo se asume que su corriente de arranque (1) no está limitada por el ajuste de arranque del dispositivo primario. Éste es un estudio basado en un sistema en particular, las condiciones del estudio pueden cambiar debido a la dependencia topológica, estados operativos y esquemas de protección; pero es posible obtener un estudio cualitativo de sensibilidad de los tres tipos de relevadores de sobrecorriente.

La corriente de falla mínima se determina como una falla bifásica en condiciones de generación mínima y ubicada en el Bus 4. El valor aceptado de sensibilidad es 1.5.⁵ En la figura 5b se muestran los valores de sensibilidad de los relevadores para diferentes valores de corriente de carga (I_k) y contribuciones de la fuente de generación (P_{Gen}). Se observa que los relevadores convencional (plano 1) y de secuencia negativa (plano 2) son insensibles al cam-

bio de demanda y mantienen la misma sensibilidad, debido a que su corriente de arranque es independiente de la dinámica de la carga. En cambio, el relevador adaptativo tiene un ajuste que depende de la dinámica de la carga, esto resulta en un incremento de la sensibilidad del relevador durante condiciones de demanda mínima comparado con los otros relevadores (ver plano 3 en la figura 5b).

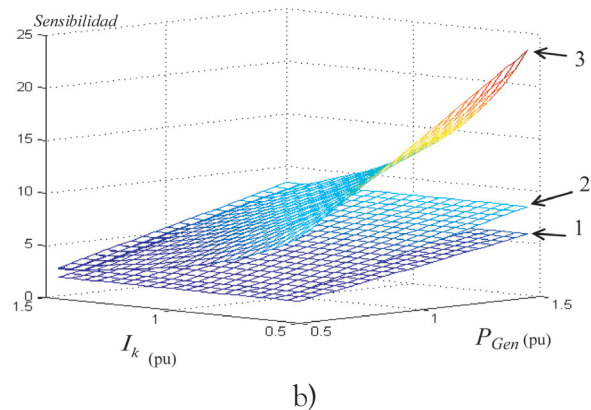
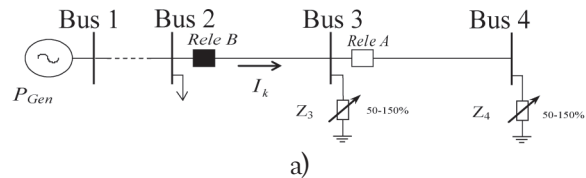


Fig. 5. Sensibilidad de relevadores de sobrecorriente de fase.

Durante condiciones de mayor contribución de potencia (P_{Gen}) en la red, la sensibilidad de los tres tipos de relevadores analizados se incrementa (mayor corriente de falla). En el relevador adaptativo se presenta un incremento mayor de sensibilidad comparada con los otros relevadores. Es posible concluir que el relevador adaptativo presenta mayor sensibilidad que los relevadores convencionales y de secuencia negativa, durante condiciones de demanda mínima y durante estados operativos de mayor contribución de potencia, debido a su mayor dependencia a la dinámica de la corriente de carga y a la variación del estado operativo (contribución de potencia). La sensibilidad del relevador de secuencia negativa es similar a la del relevador adaptativo únicamente en demanda máxima y sólo para fallas bifásicas. La sensibilidad del relevador adaptativo siempre es mayor que la del relevador convencional.

Podemos concluir que el relevador convencional presenta menor sensibilidad, el relevador de secuencia negativa es más sensible en líneas multiterminales (pero sólo para fallas bifásicas). El relevador adaptativo, en cambio, tiene una mayor sensibilidad en redes radiales, y en redes multiterminal tiene mayor sensibilidad que el relevador de secuencia negativa en demanda mínima, cuando el relevador más lo necesita.

B. Análisis de tiempo de operación

El análisis de tiempo de operación se efectuó en el sistema radial de la figura 5a. La corriente de arranque se determinó por Z_3 y Z_4 , ambos ajustados a 100%. La figura 6 muestra el resultado del análisis de tiempo de los relevadores de sobrecorriente de fase. Se observa que el tiempo de respaldo del relevador de secuencia negativa es menor que el del similar convencional. El relevador adaptativo presenta un retardo constante (CTI), independiente de la magnitud de la falla, esto resulta en tiempos menores de respaldo que los relevadores restantes.

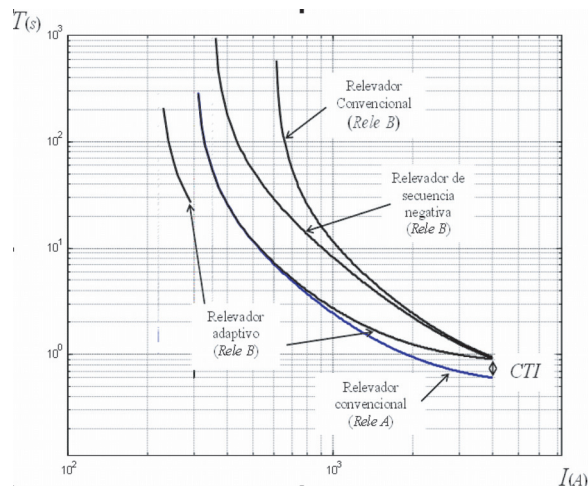


Fig. 6. Comparación de curvas de tiempo de relevadores de sobrecorriente.

Si la corriente de falla es menor que la corriente de arranque de la protección primaria, el relevador adaptativo podrá detectar la falla (lógica de detección de falla), por tanto, la corriente de arranque del relevador adaptativo, que realiza funciones únicamente de detección de falla, puede ser activada y definir, como en los relevadores convencionales, el

tiempo de operación. Este criterio puede ser opcional al usuario. La activación de este criterio ofrece una solución a la pérdida de sensibilidad de la protección primaria, sobre todo en condiciones de demanda mínima. La curva de tiempo del relevador adaptativo será la misma que la de la protección primaria sin el CTI. Para la activación de esta lógica se tendrán que cumplir las condiciones de detección de falla (señal T en figura 4) y el cumplimiento de la condición $I_k < I_a^p$. Para el ejemplo mostrado en la figura 6, el relevador primario tiene 300 A como ajuste de I_a^p , y el relevador adaptativo tiene 220 A como el mínimo ajuste para condiciones de demanda mínima. Para cualquier falla entre 220-300A, el relevador adaptativo tendrá mayor sensibilidad que el relevador primario, por lo tanto, la falla a través de alta impedancia será detectada.

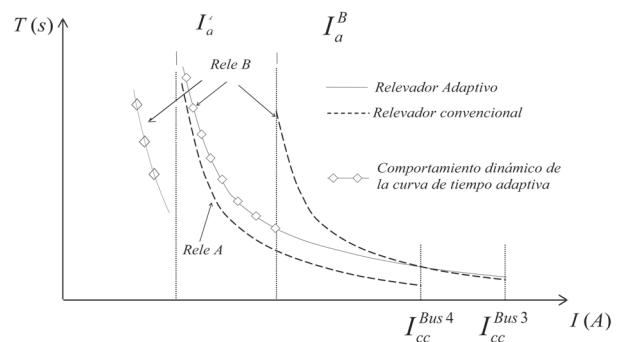


Fig. 7. Comportamiento resultante del relevador adaptativo.

En la figura 7, el efecto combinado del relevador propuesto es mostrado. El relevador modifica su corriente de arranque según (1), este valor limita la longitud de la curva de tiempo; se tendrá entonces un comportamiento dinámico de la curva de tiempo, dependiendo del valor vigente de la corriente de arranque. Durante demanda máxima, el relevador adaptativo será aún más sensible que el relevador convencional, debido a que su ajuste será 15% mayor que la corriente de carga comparado con el 1.5 o 2.0 veces, en un relevador convencional. El tiempo de respaldo (4) será sólo el CTI mayor que el tiempo de operación del primario para cualquier valor de corriente de falla. Por tanto, la sensibilidad y el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente mejoran mediante cambios dinámicos de ajuste

Prueba

El desempeño de la lógica adaptativa de la corriente de arranque se evaluó mediante simulación digital, utilizando señales reales provenientes de un simulador físico de sistemas de potencia. La evaluación se realizó en base al sistema eléctrico presentado en la figura 5a. No es necesario considerar una configuración del sistema eléctrico más compleja; el uso de sistemas complejos no nos conduce a efectos inesperados. Muchos escenarios tienen el mismo efecto en la corriente de operación; además, el proceso de coordinación entre relevadores de sobrecorriente se efectuó con parejas de relevadores. La figura 8 muestra la operación típica de una red de subtransmisión y distribución. La lógica adaptativa se mantiene en condiciones de estado estable, variando en función de la corriente de carga, hasta que la corriente del sistema sea mayor que la corriente de arranque. Como el algoritmo usa la información de demanda, el ajuste de la corriente de arranque (I_a) es constante en cada intervalo de demanda. La lógica de operación es satisfactoria.

El valor acumulado del integrador (G_k es el valor de la integración en (4)) o, análogamente, la posición del disco de inducción en un relevador electromecánico, depende de I_k . Durante operación, la integración de la función $T(I_k)$ es positiva, incrementando el valor acumulado del integrador (incremento en la distancia de viaje del disco hacia la posición de disparo); de otra manera, en la zona de reposición, la integración es negativa y decrece el valor acumulado del integrador (retorno del disco hacia la posición inicial). La condición de operación se da cuando $G_k=1$ (ver figura 8).

La evaluación del tiempo adaptativo consiste en la comparación del tiempo de operación del relevador adaptativo respaldando a un relevador digital para valores constantes de falla. Conde *et al.*⁹ presentan las pruebas de evaluación con un relevador electromecánico. El objetivo principal de la prueba es demostrar que el retardo de tiempo en la operación del relevador adaptativo respecto a la operación del relevador convencional es constante para diferentes valores de corriente de falla, obteniendo así una coordinación automática entre ambos relevadores.

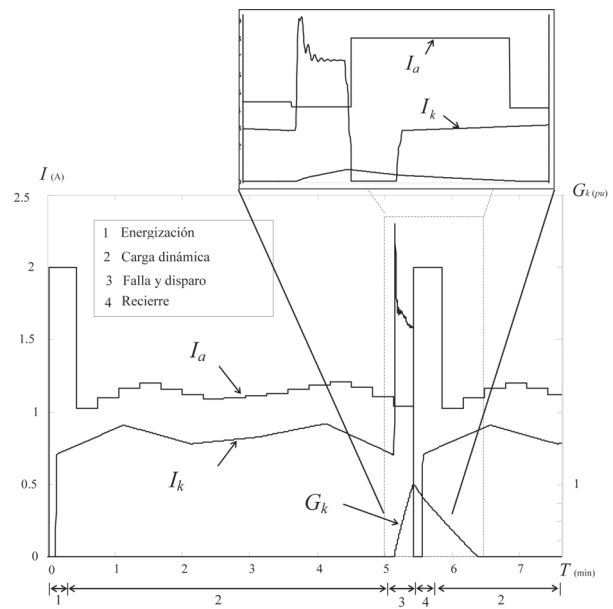


Fig. 8. Evaluación de la lógica de control de la corriente adaptativa de arranque.

El relevador adaptativo se programó en una tarjeta de adquisición de señales. Las señales de prueba se obtuvieron de un simulador físico de sistema eléctrico de potencia. Se tomaron diez pares de valores tiempo-corriente de la curva de tiempo del relevador digital publicada por el fabricante. Los valores de corriente se definieron con espaciamiento uniforme.¹⁰ Un intervalo constante se estableció desde el múltiplo 2 hasta el múltiplo 20.

La expresión analítica del relevador digital es:

$$T = \frac{0.052}{I^{0.02} - 1} + 0.113$$

Esta expresión se introdujo en el relevador adaptativo, definiendo así su característica de operación (4). En la tabla I y en la figura 9 se muestran los tiempos de operación obtenidos por el relevador digital y los tiempos de operación del relevador adaptativo. De los resultados obtenidos observamos que el intervalo entre los tiempos de operación del relevador digital y el relevador adaptativo es muy cercano al intervalo de coordinación previamente definido (0.3 s). Las variaciones observadas se deben al ruido presente durante la prueba.

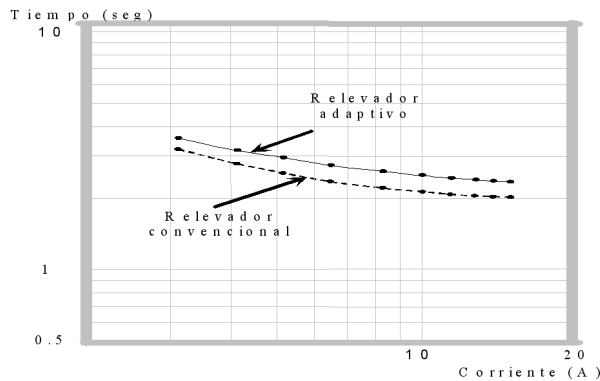


Fig. 9. Evaluación de coordinación entre un relevador convencional y un relevador adaptativo.

Tabla I. Tiempos promedio de operación.

I_{cc}	Tiempos de operación			Diferencia
	Relevador adaptativo	Relevador digital		
		Medido	Analítico	
3.1	2.63	2.25	2.38	0.315
4.1	2.20	1.87	1.92	0.305
5.1	2.0	1.65	1.68	0.335
6.4	1.80	1.45	1.48	0.335
8.2	1.65	1.29	1.32	0.345
10.0	1.52	1.19	1.21	0.320
11.9	1.45	1.11	1.13	0.330
13.6	1.40	1.05	1.08	0.335
14.5	1.37	1.04	1.05	0.325
15.5	1.35	1.02	1.03	0.325

La coordinación entre el *Rele A* y *Rele B* del diagrama unifilar de la figura 5a también se evaluó con corrientes de falla dinámicas. La señal de corriente de falla y el proceso de integración de los relevadores se obtuvieron en pruebas de laboratorio y simulación digital, respectivamente.

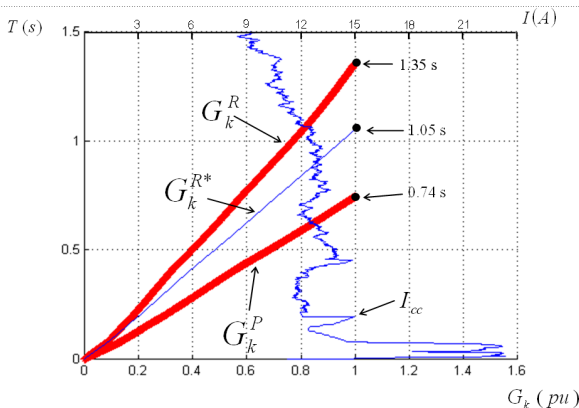


Fig. 10. Comparación de los valores acumulados de los integradores de relevadores de sobrecorriente ante corrientes de fallas dinámicas.

En la figura 10 se muestra la corriente de falla dinámica (I_{cc}), los valores de los integradores del *Rele A* (G_k^P), *Rele B* (G_k^R) y el relevador propuesto *Rele B** (G_k^{R*}). Se observa que el intervalo de tiempo entre el *Rele A* y el *Rele B* es de 0.61s, sin embargo, la diferencia en el tiempo de operación del *Rele A* y el *Rele B** es de 0.3s (CTI). Esta reducción de 0.31s en el tiempo de respaldo se obtiene con la estructura adaptativa propuesta.

Conclusiones

Los criterios adaptativos propuestos incrementan la sensibilidad y reducen los tiempos de respaldo en los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso, principalmente durante escenarios de poca demanda. Los parámetros de corriente de arranque y tiempo de operación son independientes en el relevador adaptativo.

El relevador propuesto no requiere información de la red eléctrica adicional al de un relevador convencional, la rutina adaptativa se ejecuta únicamente con los fasores de corriente, esto exime de un incremento en la capacidad de hardware del relevador. Las funciones adaptativas propuestas se implementan únicamente en el software del relevador. La simplificación algorítmica se obtiene con el uso del concepto de demanda en la definición de la corriente de arranque, requiriendo actualización cada cinco minutos. Asimismo, el proceso de ajuste de curvas se da fuera de línea, sin carga computacional al relevador. Entonces, el proceso adicional para el relevador adaptativo es mínimo. De las observaciones anteriores, el relevador propuesto se obtiene con únicamente un ligero cambio en el "firmware" del relevador sin costo adicional.

Resumen

En este artículo se recomienda una nueva lógica funcional para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso. Este relevador tiene mayor sensibilidad y tiempos de operación de respaldo reducidos comparados con relevadores convencionales; la información requerida por el relevador propuesto se determina únicamente en la localidad del relevador. Se

presenta el diagrama funcional del relevador, describiendo cada uno de sus bloques funcionales. El desempeño del relevador propuesto se compara con relevadores de sobrecorriente convencionales y relevadores de sobrecorriente de secuencia negativa; los resultados del análisis de sensibilidad y tiempo de operación se presentan. Se presentan los resultados obtenidos, tanto de simulaciones digitales como en pruebas de laboratorio.

Palabras clave: Relevador de sobrecorriente, Relevador adaptativo, Corriente de arranque, Curva de tiempo.

Abstract

This paper presents a new logic of operation for time overcurrent relays. With the application of the proposed technique, the sensitivity of time overcurrent relays is increased. In order to obtain this, the relay operates with a dynamic pickup setting like load current. Additionally a fast operation of overcurrent relays is obtained. The functional structure is described and the logic of overcurrent relay is evaluated under different operative states. We describe the functional structure of the proposed relay and its implementation in laboratory tests.

Keywords: Overcurrent relay, Pick-up current, Sensitivity.

Referencias

1. H. Askarian, et al. "A new optimal approach for coordination of overcurrent relays in interconnected power systems," IEEE Transactions on power delivery, vol. 18, No. 2, April 2003.
2. A. J. Urdaneta, et al., "Optimal coordination for direccional overcurrent relays in interconnected power systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 903-911.
3. A.Y. Abdelaziz, H.E.A. Talaat, A. I. Nosseir and Ammar A. Hajjar, "An adaptive protection scheme for optimal coordination of overcurrent relays;" Electric Power Systems Research, Vol. 61, Issue 1, 28 February 2002, pp. 1-9.
4. A. F. Elneweihi, E.O. Schweitzer, III, M.W. Feltis, "Negative-sequence overcurrent element application and coordination in distribution protection," IEEE Power engineering society, PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 12-16, 1992.
5. ANSI/IEEE Std 141-1986, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
6. M. S. Sachdev, J. Singh, and R.J. Fleming, "Mathematical models representing time-current characteristics of overcurrent relays for computer application," IEEE Paper A78 131-5, January 1978.
7. J. E. Hieber, "Empirical equations of overcurrent relay curves for computer application," IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., January/February 1965, Paper No. 31 CP 65-91, pp. 1-11.
8. IEEE Standard C37.112-1996, IEEE Standard Inverse-time Characteristic Equations for Overcurrent Relays.
9. A. Conde, E. Vázquez, H. J. Altuve, Time overcurrent adaptive relay, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 25(10) 2003, pp. 841-847.
10. IEEE Committee Report, "Computer representation of overcurrent relay characteristics," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1659-1667.

*Recibido: 7 de septiembre de 2007
Aceptado: 17 de septiembre de 2007*